

І.М. БЕРНИК, Вінницький державний аграрний університет

ВСТАНОВЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИЛУЧЕННЯ ПЕКТИНУ З ЯБЛУЧНИХ ВИЧАВОК В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОЛІ

У роботі представлені результати проведеного повнофакторного експерименту. Встановлені залежності ступеня вилучення пектину від основних параметрів впливу, побудовані поверхні відгуків критеріїв оптимізації.

The results of the conducted multifactor experiment are presented in work. Dependences of degree of extraction of pectin are set on the basic parameters of influencing, the surfaces of reviews of criteria of optimization are built.

Актуальним питанням сьогодення є впровадження прогресивних технологій переробки та використання вторинних сировинних ресурсів, за допомогою фізико-механічних способів обробки сировини. Значний інтерес викликає використання механічних коливань ультразвукового діапазону [1 – 3].

Виробництво пектину є важливою невід’ємною складовою харчової, фармацевтичної та хімічної промисловості, при цьому техніка та технологія його виробництва, які повинні бути орієнтована на екологічність та універсальність розвинуті недостатньо [4 – 7].

У зв’язку з цим набуває актуальності задача розробки високоефективних енергозберігаючих та екологічно чистих процесів та обладнання, що дозволяють реалізувати переваги використання ультразвуку для отримання пектину з рослинної сировини, зокрема яблучних вичавок. Для створення методики розрахунку та конструювання ультразвукових кавітаційних апаратів, а також для визначення оптимальних параметрів обробки сировини в ультразвуковому полі доцільно використовувати планування експерименту.

Розробка методики експериментів та оцінка точності вимірювань. Задача визначення залежності ступеню вилучення C_v , від факторів впливу, для виявлення раціональних параметрів обробки сировини, є функцією відгуку параметрів:

$$C_a = f(b, t, t), \quad (1)$$

$$C_a = f(I, t, \tau), \quad (2)$$

де b – товщина шару продукту, мм; τ – тривалість процесу обробки, хв.; t – температура гідролізу-екстрагування, °С; I – інтенсивність ультразвукового поля, Вт/см².

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на значення ступеня виходу пектину C_v при проведенні однофакторних експериментів пов'язаний із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому, на наш погляд, доцільно провести багатофакторний експеримент для отримання рівнянь регресії функції відгуку C_v за допомогою планування багатофакторного експерименту виду 2^3 методом Бокса-Уілсона [8].

Для кодування факторів використовували лінійне перетворення факторного простору [1] за формулою:

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j} \quad (3)$$

Вибрані рівні та інтервали варіювання представлені в табл. 1 та табл. 2.

Таблиця 1

Дійсні значення факторів та рівні їх варіювання

№	Фактори	Рівні факторів					
		-1,682	-1	0	+1	+1,682	Інтервал варіювання
1	Товщина шару продукту, мм (x_1)	10	20,14	35	49,86	60	14,86
2	Тривалість обробки, хв. (x_2)	15	24,12	37,5	50,88	60	13,38
3	Температура гідролізу-екстрагування, °С (x_3)	25	35,14	50	64,86	75	14,86

Для побудови регресійної моделі досліджуваної системи використовуємо квадратичне рівняння регресії 2-го порядку з ефектами взаємодії 1-го порядку, яке має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (4)$$

де y – функція відгуку; $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Таблиця 2

Дійсні значення факторів та рівні їх варіювання

№	Фактори	Рівні факторів					
		-1,682	-1	0	+1	+1,682	Інтервал варіювання
1	Інтенсивність ультразвукового поля, Вт/см ² (x ₁)	2	5,65	11	16,35	20	5,35
2	Тривалість обробки, хв. (x ₂)	15	30,21	52,5	74,79	90	22,29
3	Температура гідролізу-екстрагування, °C (x ₃)	25	35,14	50	64,86	75	14,86

Адекватність регресійних моделей перевірялася за критерієм Фішера [8]:

$$F = \frac{S_{\hat{a}\hat{a}}^2}{S_{\hat{a}^3\hat{a}\hat{o}}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (5)$$

де $S_{\text{ад}}$ – дисперсія адекватності; $S_{\text{відт}}$ – дисперсія відтворюваності. $[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера; $f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності; $f_2 = n - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності; d – кількість значимих коефіцієнтів регресії (2); n – кількість попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при $F \leq [F(f_1, f_2)]$ регресійна модель вважалася адекватною.

Дисперсія відтворюваності визначалася за формулою [1]:

$$S_{\text{відт}}^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (6)$$

де y_i – результат i -го повторного дослідів; \bar{y} – середнє арифметичне значення результатів n повторних дослідів.

Кількість повторних дослідів в кожній точці плану експерименту знаходилась за формулою [9]:

$$n \geq \frac{1 + P_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}} + 2n_{\hat{a}^3\hat{a}\hat{e}}}{1 - P_{\hat{a}\hat{a}\hat{a}}}, \quad (7)$$

де P_{aia} – довірна ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах; $n_{відк}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно рекомендацій авторів робіт [9, 10] довірна ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при $n_{відк} = 0$

$$n \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} = 9...19$$

Дисперсія адекватності визначалася за формулою [1]:

$$S_{a\partial}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (8)$$

де y_i – результат i -го дослід, проведеною за матрицею планування; \tilde{y}_i – результат i -го значення дослід, передбаченого за допомогою регресійної моделі (2).

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за t -критерієм Стюдента [1]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{відм} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (9)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Стюдента, яке рівне значенню розподілу Стюдента; $c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1} .

Розрахункове значення критерію t_i порівнювалося з критичним і при $t \leq [t(f_2)]$ i -й коефіцієнт регресії вважався незначним.

Результати експериментальних досліджень. Для функції відгуку $C_e = f(b, t, t)$ рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд:

$$C_a = 23,91 - 12,61x_1 + 5,388x_2 + 0,1434x_3 - 2,48x_1x_2 - 0,2838x_1x_3 - 0,43x_2x_3 + 4,572x_1^2 + 0,04493x_2^2 - 2,979x_3^2 \quad (10)$$

При цьому $S_{\text{відм}}^2 = 0,8083$; $S_{\text{ад}}^2 = 2,163$; $F = 2,676 < [F] = 2,677$, отже регресійна модель (10) адекватна. Коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,9937$.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку $C_e = f(b, t, t)$ має вигляд:

$$C_{\hat{a}} = 19,27 - 1,83b + 0,8392t + 1,359t - 0,01247bt - 0,00128bt - 0,00216tt + 0,0207b^2 + 0,000251t^2 - 0,01349t^2 \quad (11)$$

Після відкидання незначних ефектів взаємодій рівняння регресії (11) для дійсних значень виглядає таким чином:

$$C_e = 13,32 - 1,83b + 0,8392t + 1,359t - 0,01247bt + 0,0207b^2 - 0,01349t^2 \quad (12)$$

Для функції відгуку $C_e = f(I, t, t)$ рівняння регресії згідно проведеного багатфакторного експерименту для кодованих значень має вигляд:

$$C_e = 72,33 + 13,75x_1 + 11,7x_2 - 0,7622x_3 + 0,1713x_1x_2 - 0,5913x_1x_3 - 1,191x_2x_3 - 9,622x_1^2 - 2,365x_2^2 - 5,5x_3^2 \quad (13)$$

При цьому $S_{\text{відм}}^2 = 3,436$; $S_{\text{ад}}^2 = 9,193$; $F = 2,675 < [F] = 2,677$, отже регресійна модель (14) адекватна. Коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,9866$.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку $C_e = f(I, t, t)$ має вигляд:

$$C_{\hat{a}} = -84,15 + 9,966I + 1,025t + 2,44t + 0,001436It - 0,00744It - 0,0036tt - 0,3362I^2 + 0,00476t^2 - 0,02491t^2 \quad (14)$$

Після відкидання незначних ефектів взаємодій рівняння регресії (14) для дійсних значень виглядає таким чином:

$$C_e = -96,86 + 9,966I + 1,025t + 2,44t - 0,3362I^2 + 0,00476t^2 - 0,02491t^2 \quad (15)$$

Параметрична оптимізація технологічних параметрів вилучення пектину. На рис. 1 показано поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх дво-

мірні перерізи залежності ступеня виходу пектину $C_e = f(b, t, t)$ від окремих дійсних значень параметрів оптимізації: товщини шару продукту b , тривалості обробки τ , температури гідролізу-екстракції t .

На рис. 2 показано поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи залежності ступеня виходу пектину $C_e = f(I, t, t)$ від окремих дійсних значень параметрів оптимізації: інтенсивності ультразвукового поля I , тривалості обробки τ , температури гідролізу-екстракції t .

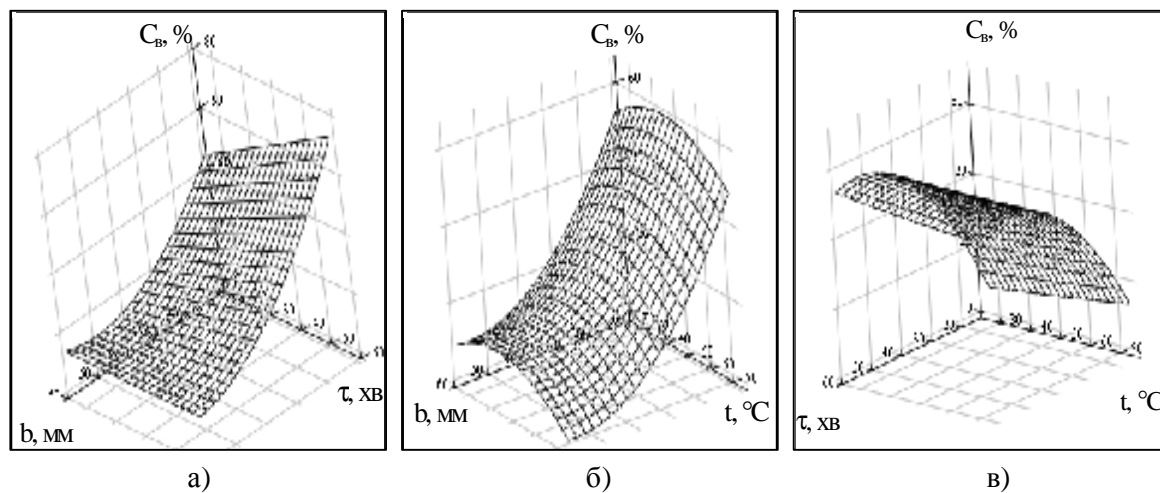


Рис. 1. Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень ступеня виходу пектину $C_e = f(b, t, t)$ в площині дійсних значень параметрів оптимізації:

а) $C_B = f(b, t)$; б) $C_B = f(b, t)$; в) $C_B = f(t, t)$

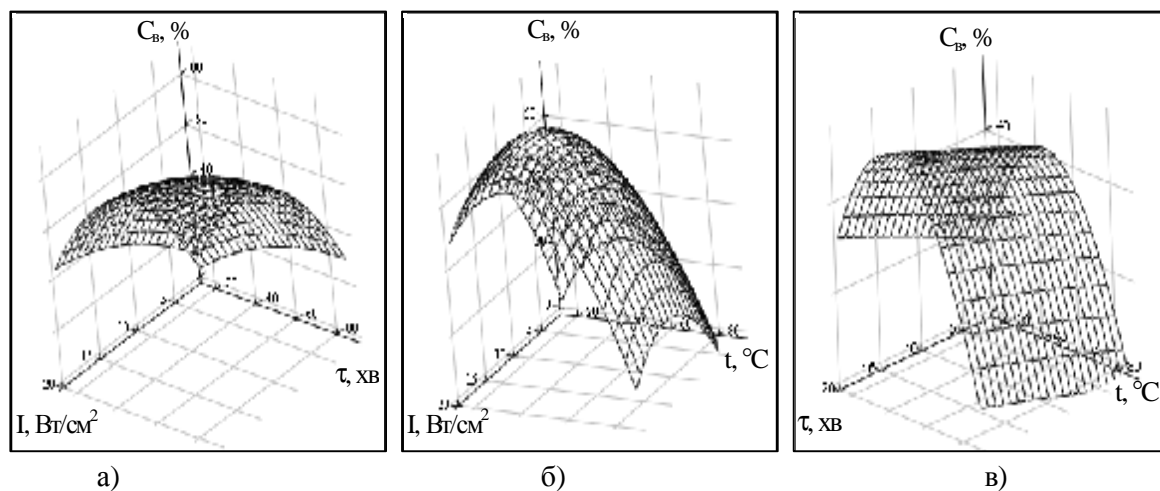


Рис. 2. Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень ступеня виходу пектину $C_e = f(I, t, t)$ в площині дійсних значень параметрів оптимізації:

а) $C_B = f(I, t)$; б) $C_B = f(I, t)$; в) $C_B = f(t, t)$

Висновки.

У результаті проведення багатofакторного експерименту отримано квадратичні рівняння регресії, які дозволяють адекватно описати залежність значень величини ступеня виходу пектину C_v від основних параметрів впливу: інтенсивності ультразвукового поля I , товщини шару продукту b , тривалості обробки τ та температури гідролізу-екстрагування t .

Побудовані поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи дозволяють наглядно ілюструвати залежності значень величини ступеня виходу пектину C_v від окремих параметрів оптимізації та місцезнаходження оптимумів.

Список літератури: 1. *Новицкий Б.Г.* Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии) / *Б.Г. Новицкий*. – М.: Химия, 1983. – 192 с. 2. *Луговской А.Ф.* Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / *А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев*. – К.: Видавничо-поліграфічний центр „Київський університет”, 2007. – 244 с. 3. *Эльпинер И.Е.* Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / *И.Е. Эльпинер*. – М.: Физматгиз, 1963. – 420 с. 4. *Botger L.* Pectin application – some practical problems / *L. Botger* // in Gum and Stabilisers for the Food industry 5 eds. G.O. Philips, D.J. Wedlock and P.A. Williams. – N.-Y.: Oxford University Press Inc., 1990. 5. *Кочеткова А.А.* Некоторые аспекты применения пектина / *А.А. Кочеткова* // Пищевая промышленность. – 1992. – № 7. 6. *Комисаренко С.В.* Пектины – их свойства и применение / *С.В. Комисаренко, В.Н. Спиридонов* // Растительные ресурсы. – 1998. – Т. 34. – Вып. 1. 7. *Зайко Г.М.* Получение очищенного пектина для использования в лечебных и профилактических целях / *Г.М. Зайко, М.Ю. Таманова* // Известия вузов. Пищевая технология. – 1998. – № 1. 8. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / *Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский*. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Наука, 1976. – 280 с. 9. *Левшина Е.С.* Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи): учеб. пособие для вузов / *Е.С. Левшина, П.В. Новицкий*. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1983. – 320 с. 10. *Новицкий П.В.* Оценка погрешностей результатов измерений / *П.В. Новицкий, И.А. Зограф*. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 114 с.

Надійшла до редколегії 15.06.09